

Consideraciones de diseño de adaptación activa para antenas cargadas con circuitos non-Foster

Fernando Albarracín-Vargas⁽¹⁾, Eduardo Ugarte-Muñoz⁽¹⁾, Vicente Gonzalez-Posadas⁽²⁾, Daniel Segovia-Vargas⁽¹⁾.

falbarracin@tsc.uc3m.es, eugarte@tsc.uc3m.es, vgonzalz@diac.upm.es, dani@tsc.uc3m.es

⁽¹⁾ Dpto. de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad Carlos III de Madrid, Avenida de la Universidad 30, 28911, Leganés, Madrid.

⁽²⁾ Dpto. Ingeniería Audiovisual y Comunicaciones, Universidad Politécnica de Madrid, Carretera de Valencia km. 7, 28031, Madrid.

Abstract- Most recent works on active matching for one-port and two-port small antennas (ESAs) have taken special care in the design and construction of non-Foster circuits to implement an active matching network. In this paper, new considerations for the design of non-Foster matched two-port antennas are shown, specifically, finding a suitable location for the non-Foster element and viewing the changes in the host antenna performance once a matching network is placed on it.

I. INTRODUCCIÓN

El uso de redes de adaptación activa que utilicen circuitos que no obedecen el principio de Foster, el cual establece un crecimiento monótono de la reactancia respecto a la frecuencia, es la idea básica para superar las limitaciones inherentes de la adaptación pasiva impuesta por la teoría de Bode-Fano. Este principio afirma que se puede lograr un nivel dado de adaptación en un ancho de banda de adaptación muy pequeño utilizando condensadores e inductores sin pérdidas, o lograr anchos de banda más grandes mediante la inclusión de pérdidas en la red de adaptación de la antena, lo que resulta en una eficiencia pobre y, por lo tanto, una baja ganancia [1]. El alto factor de calidad Q presente en las antenas eléctricamente pequeñas (ESA) caracterizada por una alta reactancia y pequeñas resistencias de radiación establece un limitante fundamental en el ancho de banda alcanzable, derivado por Chu [2] y hace de este tipo de antenas, en general, difíciles de adaptar. Diversos autores han utilizado elementos non-Foster para superar estas limitaciones. La idea básica de adaptación activa es compensar la reactancia de la antena con elementos non-Foster, con el fin de adaptar la antena sobre anchos de banda más amplios. Estos elementos non-Foster (entendidos como condensadores y bobinas de valor negativo) se implementan con circuitos activos de 2 puertos denominados convertidores de impedancia negativa (NIC por sus siglas en inglés) [3]. Un NIC es un circuito activo de 2 puertos, en el que un puerto presenta una versión negada de la impedancia cargada en el otro puerto (ver Fig. 1). Este tipo de circuitos suelen presentar problemas de estabilidad que deben tenerse en cuenta durante la fase de diseño [3].

$$Z_{NIC} = -k \cdot Z_L \quad (1)$$

La mayoría de los trabajos realizados en adaptación activa de antenas se han llevado a cabo utilizando antenas de un solo puerto: colocando la red de adaptación non-Foster a la salida, como si se tratara de una adaptación externa convencional [1] o bien integrando la propia red non-Foster dentro de la antena [4], [5].

No obstante, en [6] se propuso el uso de antenas de dos puertos, en el que en un puerto se sitúa la red de non-Foster apropiada, y el otro se utiliza como puerto de alimentación de la antena. Este nuevo enfoque no ha sido tan estudiado pero parece ser una prometedora y más coherente forma de obtener diseños más estables y de gran ancho de banda. Nótese, que las antenas de un puerto que integran la red de non-Foster en su interior, pueden considerarse también como antenas de dos puertos, y analizarse utilizando este tratamiento.

El trabajo actual muestra no sólo una técnica para encontrar un emplazamiento adecuado para el circuito non-Foster en la antena a través del estudio del parámetro de sensibilidad $Sens$ derivado de un análisis de los parámetros de dispersión S , independiente de la naturaleza de la estructura (es decir, plana, 3D o lineal). También muestra cómo se puede ver afectada la distribución de corrientes (y también el diagrama de radiación) cuando una antena (por ejemplo, una antena lazo lineal simple) se carga con elementos non-Foster.

El artículo está organizado del siguiente modo: Después de esta breve introducción, en la sección II se presenta el concepto de adaptación activa utilizando antenas de dos puertos, así como el parámetro de sensibilidad. En la sección III se presentan las principales consideraciones de diseño de antenas con adaptación activa a través de un ejemplo de diseño con una estructura común y finalmente en el apartado IV se exponen las conclusiones del trabajo.

II. PARÁMETRO DE SENSIBILIDAD Y EL MODELO ANTENA DE DOS PUERTOS

El esquema de adaptación activa utilizando una antena de 2 puertos se muestra en la Fig. 1. El puerto 2 de la antena se carga con una red non-Foster (implementada por el NIC), de tal manera que la impedancia de entrada en el puerto 1 sea

igual a una determinada impedancia de referencia Z_0 , y de este modo obtener grandes anchos de banda.

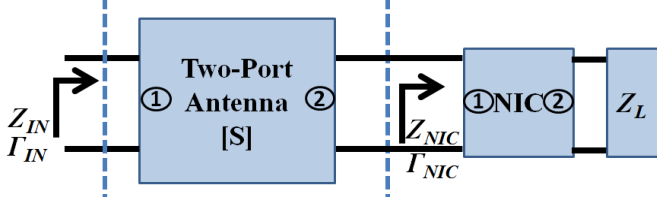


Fig. 1. Adaptación activa de una antena de dos puertos

El coeficiente de reflexión a la entrada de esta red de dos puertos cargada, Γ_{IN} está dado por (1.a). El objetivo es que este coeficiente de reflexión sea cero en todo el ancho de banda de interés. Entonces, al igualar (1.a) a cero, se puede despejar el coeficiente de reflexión óptimo que debe proporcionar el NIC, Γ_{NIC}^{opt} (1.b).

$$\Gamma_{IN} = S_{11} + \frac{S_{12} \cdot S_{21} \cdot \Gamma_{NIC}}{1 - S_{22} \cdot \Gamma_{NIC}} = 0 \rightarrow \quad (1.a)$$

$$\rightarrow \Gamma_{NIC}^{opt} = \frac{S_{11}}{S_{22} \cdot S_{11} - S_{12} \cdot S_{21}} \quad (1.b)$$

Por lo tanto, la impedancia non-Foster Z_{NIC}^{opt} que se necesita para adaptar la antena en el puerto 1 puede expresarse en términos de los parámetros S de la antena como:

$$Z_{NIC}^{opt} = Z_0 \cdot \left(\frac{S_{22} \cdot S_{11} - S_{12} \cdot S_{21} + S_{11}}{S_{22} \cdot S_{11} - S_{12} \cdot S_{21} - S_{11}} \right) \quad (2)$$

Cuando esta impedancia óptima Z_{NIC}^{opt} , se sitúa en el puerto 2, el coeficiente de reflexión en el puerto 1 será cero, y por tanto es posible obtener grandes anchos de banda.

No obstante, aunque lo anteriormente comentado es cierto, desde un punto de vista práctico es muy importante analizar la sensibilidad de esta solución: $Sens$, la cual viene dada por la ecuación (3). Este parámetro proporciona información sobre cómo las variaciones de la impedancia proporcionada por el NIC con respecto a la óptima dada por (2) (inevitables en la práctica), afectan al coeficiente de reflexión a la entrada y, por lo tanto, al ancho de banda final que presentará la antena.

$$\Delta \Gamma_{IN} = \underbrace{\frac{\partial \Gamma_{IN}}{\partial \Gamma_{NIC}}}_{S} \bigg|_{\Gamma_{NIC} = \Gamma_{NIC}^{opt}} \cdot \Delta \Gamma_{NIC} \quad (3)$$

Una sensibilidad alta significa que variaciones muy pequeñas en la impedancia proporcionada por el NIC, con respecto a la óptima, se traducirán en cambios muy grandes en Γ_{IN} , y por lo tanto en el ancho de banda.

Para el caso de una antena de dos puertos la sensibilidad puede obtenerse fácilmente sin más que aplicar la definición dada en (3), a la ecuación (1). El resultado de esto se muestra en la ecuación (4), y puede observarse como $Sens$ solo depende de los parámetros S de la antena. Por este motivo, la posición de los dos puertos debe estudiarse cuidadosamente para poder obtener diseños realizables en la práctica, de modo que la sensibilidad $Sens$ sea lo más pequeña posible.

$$Sens = \left| \frac{S_{21} \cdot S_{12}}{(1 - S_{12} \cdot \Gamma_{NIC})^2} \right|_{\Gamma_{NIC} = \Gamma_{NIC}^{opt}} = \left| \frac{(S_{11} \cdot S_{22} - S_{21} \cdot S_{12})^2}{S_{21} \cdot S_{12}} \right| \quad (4)$$

En cuanto a la estabilidad, los autores proponen en [7] el uso de la denominada *Normalized Determinant Function* (NDF), que permite analizar la estabilidad del diseño completo, el NIC integrado con la antena de dos puertos, de forma exhaustiva. En cualquier caso, este artículo se centra en el análisis de la sensibilidad y otras consideraciones de funcionamiento de la antena diseñada, una vez un circuito non-Foster es ubicado en su estructura.

III. CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Con el objeto de mostrar cómo el parámetro $Sens$ y otros parámetros, que deben ser tenidos en cuenta en el diseño de antenas con adaptación activa, se utilizará una estructura común: la antena de lazo impresa.

La antena lazo impreso estudiada tiene un diámetro $D=15\text{cm}$, un ancho de lazo de 3mm sobre un sustrato FR4 de permitividad $\epsilon_r=4.3$. Como puede observarse en la Fig. 2 la antena tiene dos puertos. El primero de ellos es el puerto de alimentación, mientras que el segundo se carga con una red non-Foster.

A. Consideraciones sobre la sensibilidad

Se ha realizado un estudio paramétrico variando la posición del segundo puerto con respecto al ángulo obteniéndose la sensibilidad en cada punto como el promedio de la magnitud de (4) en el rango de frecuencias de estudio (100-1000MHz). Dicha sensibilidad se muestra en escala de colores en la Fig.2b. La sensibilidad es máxima cuando $\Phi=\pm 90^\circ$, y mínima cuando $\Phi=0^\circ$, por lo tanto, es en este punto donde la red non-Foster debe ser conectada.

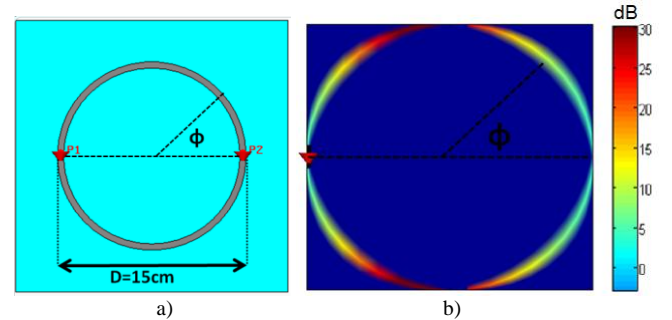


Fig. 2. Antena de lazo impreso. a) esquema de la antena, b) sensibilidad de la antena vs ubicación del puerto 2.

Dado que buscamos sensibilidades bajas para obtener diseños realizables y robustos, la antena debe presentar valores considerables de acoplo entre los dos puertos (S_{21}). Esto es lógico ya que si el S_{21} es muy pequeño la influencia de la red non-Foster conectada en el puerto 2, en el puerto 1 será también muy pequeña. Además, si los puertos están puestos de forma simétrica ($S_{11}=S_{22}$), la ecuación (4) puede reescribirse como (5).

$$Sens = \left| \frac{((S_{11} + S_{21})(S_{11} - S_{21}))^2}{S_{21}^2} \right| = \left| \frac{(S_{11}^2 - S_{21}^2)^2}{S_{21}^2} \right| \quad (5)$$

Este resultado proporciona una idea sobre los tipos de antenas más adecuados para usarse en diseños de adaptación activa. Antenas muy resonantes, de alto factor de calidad (Q), no son apropiadas ya que el S_{21} es muy pequeño, y por lo tanto la sensibilidad es muy alta con los problemas que esto conlleva. No obstante, antenas no resonantes como la antena de lazo presentada aquí, son más apropiadas. En esas antenas el S_{11} y S_{21} pueden presentar valores similares sobre grandes anchos de banda y, por lo tanto, la sensibilidad se puede mantener también baja en esos anchos de banda, siendo posible entonces diseños robustos y realizables.

B. Consideraciones sobre la eficiencia de radiación

Una vez realizado el análisis de sensibilidad, en la mejor ubicación (es decir, el punto de menor sensibilidad $Sens$ de la antena) se obtiene la impedancia necesaria en el puerto 2 para conseguir adaptación en toda la banda de estudio es Z_{NIC}^{opt} , la cual es teórica y calculada como (2) y cuyas partes real e imaginaria se muestran en la Fig. 3. Con el fin de no afectar la eficiencia de la antena y de obtener circuitos non-Foster realizables, es necesario restringir el rango de frecuencias de interés a uno en el que la parte real de Z_{NIC}^{opt} tenga valores bajos que puedan ser despreciados para no disipar en forma de calor buena parte de la energía recibida. De este modo, una aproximación de esta impedancia puede ser implementada, con un circuito puramente reactivo como un tanque LC serie, y de características non-Foster: Z_{NIC}^{subopt} , cuya reactancia vs frecuencia se muestra en la Fig. 3.

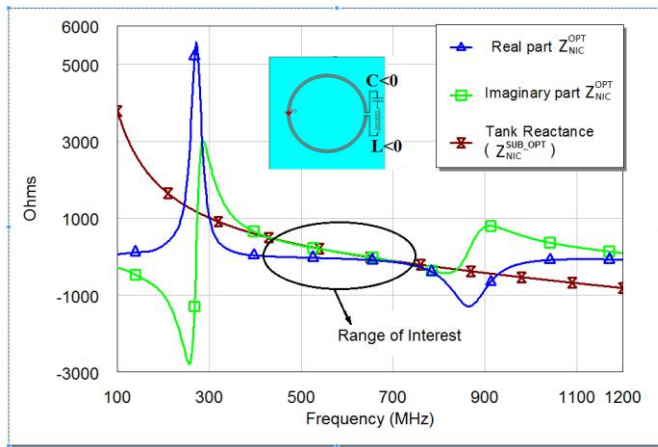


Fig. 3. Impedancia óptima Z_{NIC}^{opt} , calculado como (2), y su aproximación con un circuito tanque LC serie, puramente reactivo (Z_{NIC}^{subopt}) con elementos non-Foster en el punto más bajo de la sensibilidad de la antena

C. Consideraciones de diseño para la red non-Foster:

En este sentido, el parámetro $Sens$ nos da no sólo información sobre si una antena es adecuada para el diseño de adaptación activa, sino que también nos proporciona la mejor ubicación de la red non-Foster sobre la antena, or ejemplo el puerto 2 ubicado en $\Phi = 0^\circ$ en Fig. 2b.

Los resultados en términos de coeficiente de reflexión se muestran en la Fig. 4. Cuando el puerto 2 se sitúa en $\Phi = 0^\circ$ es más fácil implementar una red non-Foster capaz de realizar la impedancia Z_{NIC}^{subopt} que se aproxima a la Z_{NIC}^{opt} necesaria. En este caso, la sensibilidad es pequeña, y por lo tanto las pequeñas diferencias entre la impedancia que proporciona el

NIC en la práctica no afectan desmesuradamente al coeficiente de reflexión a la entrada Γ_{IN} , adaptando la antena en el ancho de banda de interés (400-600MHz). Por el contrario, cuando la red non-Foster se sitúa en el punto $\Phi = 90^\circ$ no es posible adaptar la antena debido a la alta sensibilidad. En este caso, la sensibilidad es tal que pequeñas variaciones en la impedancia proporcionada por el NIC (incluso utilizando elementos ideales) producen grandes variaciones en Γ_{IN} y por tanto en el ancho de banda esperado.

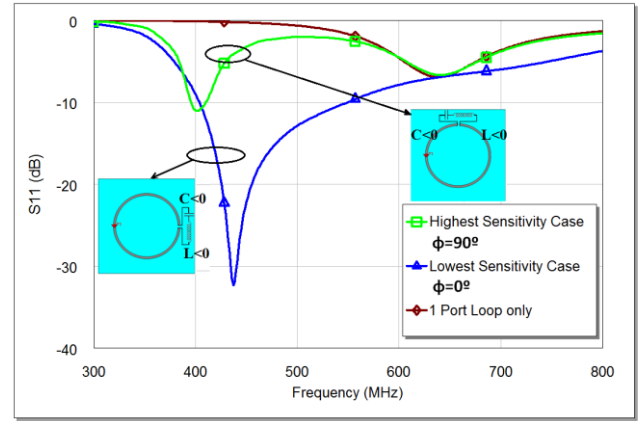


Fig. 4. S_{11} (dB) de los diseños

D. Consideraciones sobre la distribución de corrientes

De acuerdo con la estructura de la antena, la distribución de corrientes puede cambiar y diferentes modos pueden ser excitados una vez conectada una red non-Foster. En una estructura lineal (por ejemplo, la antena de lazo) las corrientes sobre la antena no cambian cuando una realización de Z_{NIC}^{subopt} se ubica en diferentes puntos (véase Fig. 5a. y Fig 5b.). De esta manera; una antena lazo es una opción adecuada cuando el objetivo es adaptación en banda ancha en un mismo modo de radiación.

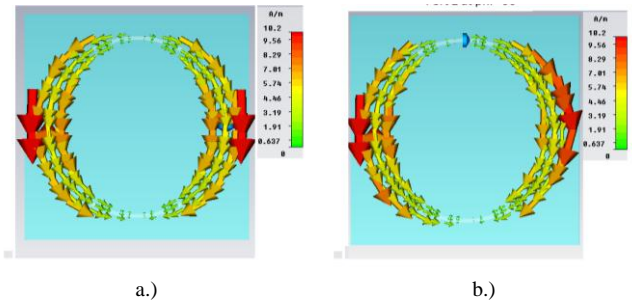


Fig. 5. Distribución de corrientes de la antena lazo con el puerto 2 cargado con Z_{NIC}^{subopt} y ubicado en a) $\Phi = 0^\circ$ y b.) $\Phi = 90^\circ$.

IV. CONCLUSIONES

Se ha demostrado que la sensibilidad $Sens$, es un parámetro muy importante cuándo se trabaja en diseños de adaptación activa empleando antenas de dos puertos. Dicho parámetro proporciona información sobre dos aspectos importantes: ¿Es la antena elegida adecuada para un diseño de adaptación activa? Y si lo es, nos permite también analizar cuál es la posición óptima para los dos puertos. Los puertos de la antena deben situarse en puntos de baja sensibilidad. De ese modo, las variaciones que se produzcan a la hora de implementar Z_{NIC}^{subopt} no producirán grandes variaciones en la

impedancia de entrada y por tanto no degradarán dramáticamente la respuesta de la antena.

Adicionalmente, otras consideraciones relevantes deben ser tenidas en cuenta, como son la eficiencia de radiación, la distribución de corrientes sobre la antena (que afecta directamente el diagrama de radiación), y la realizabilidad del circuito, asociada a la cantidad de elementos non-Foster necesarios para implementar Z_{NIC}^{subopt} .

REFERENCIAS

- [1] E. Sussman-Fort, R.M. Rudish, "Non-Foster Matching of Electrically-Small Antennas", *IEEE Trans. On Antennas and Propagation*, Vol. 57, No. 8, Agosto 2009.
- [2] N. Zhu, R. Ziolkowski, "Broad-Bandwidth, Electrically Small Antenna Augmented With an Internal Non-Foster Element", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 11, 2012, pp. 1116-1120.
- [3] J.G. Linvill, "Transistor Negative Impedance Converters", *Proceedings of the IRE*, Vol. 46, No. 6, Junio 1993.
- [4] N. Zhu, R. Ziolkowski, "Active Metamaterial-Inspired Broad-Bandwidth Efficient, Electrically Small Antennas", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 10, 2011.
- [5] H. Mirzaei, G.V. Eleftheriades, "A Wideband metamaterial-inspired compact antenna using embedded non-Foster matching", *Int.Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, pp. 1950-1953, Julio 2011.
- [6] S. Koulouridis, "Non-Foster Circuitry Design for Antennas", *Proc. of the 5th European Conference on Antennas and Propagation*, pp. 237-239, Abril 2011.
- [7] E.Ugarte-Muñoz, D.Segovia-Vargas, V.Gonzalez-Posadas, J.L.Jiménez-Posadas, "Non-Foster Matching of Electrically Small Antennas. Stability Considerations", *Int.Symposium on Antennas and Propagation 2012 (APSURSI)*, Julio 2012.